文章编号:1671-251X(2020)08-0032-06　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020030002

液压支架支护状态分类及感知原理研究

扫码移动阅读

张德生[1,2]，　魏训涛[3]，　卞冀[4]，　文治国[1,2]，　李丁一[1,2]，　杜尚宇[1,2]

(1.天地科技股份有限公司 开采设计事业部，北京　100013；
2.中煤科工开采研究院有限公司，北京　100013；
3.兖州煤业股份有限公司，山东 邹城　273500；
4.中国煤炭科工集团唐山研究院有限公司，河北 唐山　063012)

摘要:针对目前液压支架单一的姿态测量无法全面反映其综合状态，且无法实现液压支架支护状态精确感知的问题，以两柱掩护式液压支架为例，基于液压支架三维空间受力模型，从空间几何状态和结构承载 2 个方面对液压支架支护状态分类及稳定性进行了分析，指出液压支架支护关键影响参数为倾角、压力和销轴力。液压支架与围岩处于非耦合状态时易发生几何失稳:构建几何平衡方程，得出重心高度和工作面倾角是影响稳定性的关键因素;提出了顶梁、底座和前连杆 3 个倾角确定液压支架重心位置的方法，利用双轴倾角传感器实现状态感知。液压支架与围岩处于耦合状态时易发生承载失稳:构建液压支架合力作用点的精确求解方程，通过测力销轴实现顶梁与掩护梁铰接点作用力的感知，并根据平衡区理论判定承载失稳类型。

关键词:液压支架；支护状态分类；几何稳定性；承载稳定性；精确感知

中图分类号:TD353　　文献标志码:A

Research on principle of supporting status classification and sensing of hydraulic support

ZHANG Desheng[1,2], WEI Xuntao[3], BIAN Ji[4], WEN Zhiguo[1,2], LI Dingyi[1,2], DU Shangyu[1,2]

(1. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng 273500, China; 4. CCTEG Tangshan Research Institute, Tangshan 063012, China)

Abstract: Aiming at problem that single attitude measurement of hydraulic support can not fully reflect comprehensive state of hydraulic support, and can not realize accurate perception of supporting state of hydraulic support, taking two column shield hydraulic support as an example, based on three-dimensional space stress model of hydraulic support, supporting state classification and stability of hydraulic support are analyzed from two aspects of spatial geometric state and structural load, and it is pointed out that the key influencing parameters of hydraulic support are inclination angle, pressure and pin force. When hydraulic support and surrounding rock are in uncoupled state, geometric instability is easy to occur: the geometric equilibrium equation is constructed, and the height of gravity center and the dip angle of working face are the key factors affecting the stability; A method of determining the center of gravity position of hydraulic support with three inclination angles of top beam, base and front link is put forward, and the state perception is realized by using dual axis inclination sensor. When hydraulic support and surrounding

收稿日期:2020-03-02;**修回日期**:2020-06-16;**责任编辑**:王晖，郑海霞。

基金项目:天地科技创新创业资金资助项目(2018-TD-ZD08,2020-TD-ZD005);国家自然科学基金联合项目(U1610251);山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY04);中央国有资本金资助项目(财企[2013]472)。

作者简介:张德生(1982－)，男，江苏丰县人，研究员，博士，现主要从事煤炭综采工作面支护及辅助作业技术与装备的研发工作，E-mail: zhangdesheng@tdkcsj.com。

引用格式:张德生，魏训涛，卞冀，等.液压支架支护状态分类及感知原理研究[J].工矿自动化，2020，46(8):32-37.
ZHANG Desheng, WEI Xuntao, BIAN Ji, et al. Research on principle of supporting status classification and sensing of hydraulic support[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 32-37.

rock are in coupling state, bearing instability is easy to occur: accurate solution equation of the resultant force point of the hydraulic support is constructed, the state perception of the top beam and the shield beam is realized by the force measuring pin shaft, and the bearing instability type is determined according to the balance zone theory.

Key words: hydraulic support; supporting status classifying; geometric stability; support stability; precise perception

0　引言

智能化开采已成为煤炭工业高质量发展的重要方向[1],液压支架作为综采工作面的主要装备,其支护状态的精确识别是工作面自适应控制和协同推进的基础,对其支护状态的研究从传统的矿压观测向姿态监测等全工况发展,以提高工作面支护质量和自动化水平。

近年来,许多学者对液压支架支护状态进行了研究。文献[2]分析了大采高工作面液压支架倒架失稳因素,建立了液压支架的多体动力学模型。文献[3]研究了大倾角条件下支架稳定性分类并提出了相应改进和管理措施。文献[4]给出了大倾角综放工作面支架状态与工作面倾角的量化关系。文献[5-6]研究了两柱掩护式液压支架的承载特性。文献[7-8]给出了基于倾角的液压支架姿态解算方法。文献[9]开展了支护质量模糊综合评价工作。以上研究主要从几何稳定状态、承载特性等方面进行,单一的姿态测量无法全面反映液压支架的综合状态,无法实现液压支架支护状态的精确感知[10-13]。

本文以两柱掩护式液压支架为例,从空间几何和结构承载 2 个方面对液压支架支护状态进行分析,并提出关键参数的感知方法,为液压支架状态监测和稳定判别体系的构建提供理论依据。

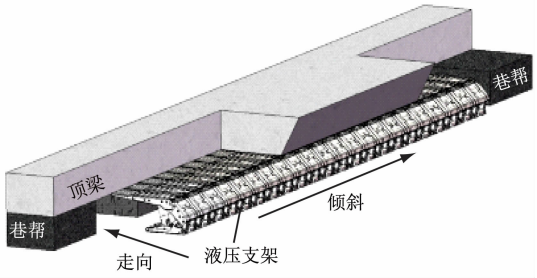
1　液压支架空间几何状态分析

1.1　工作面液压支架三维空间布置

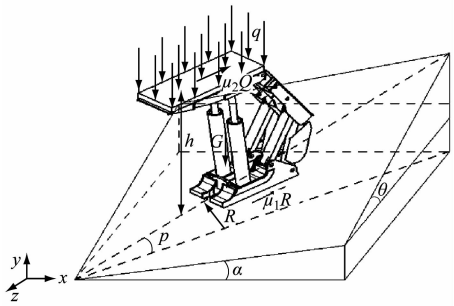
液压支架与围岩在工作面支护体系中构成“顶板-支架-底板”耦合系统,根据液压支架直接与顶、底板的接触,分为耦合和非耦合 2 种状态。耦合状态下支架与顶、底板接触并传递较大载荷,表现为承载失稳;非耦合状态下支架与顶板无接触,表现为几何失稳。

综采工作面液压支架的布置如图 1(a)所示,正常情况下,液压支架沿煤层倾斜方向布置,沿走向方向推进,液压支架的位姿和稳定性受工作面倾角影响。

液压支架空间三维受力模型如图 1(b)所示,顶梁承受顶板垂向载荷 q 和水平摩擦力 $\mu_2 Q$ 作用,底座集中载荷 R 和摩擦力 $\mu_1 R$ 及自身重力 G 作用。其中:Q 为顶梁等效集中载荷(合力);μ_1 为支架底座与底板之间摩擦因数;μ_2 为支架顶梁与顶板摩擦因数;h 为支架高度;G 为液压支架重力;α 为俯仰角(沿倾斜方向);θ 为倾斜角(沿走向方向);p 为液压支架底座在推进方向与底板的夹角。



(a) 综采工作面液压支架布置



(b) 液压支架空间三维受力模型

图 1　液压支架工作面空间布置与模型

Fig. 1　Space layout and model of hydraulic support

1.2　液压支架几何稳定性分析

在工作面走向方向,液压支架主要表现为前翻和后仰两种失稳类型。不考虑液压支架移架过程发生的偏斜($p=\alpha$),液压支架后仰状态力学模型如图 2 所示。

失稳时以底座后端 O_1 点为支点倾覆,因此,O_1 点取矩平衡方程组为

$$\begin{cases}(Q+G)\sin\alpha=\mu_1 R+\mu_2 Q\cos\alpha\\(Q+G)\cos\alpha=R\\(QL_{QO_1}+GL_{GO_1}+\mu_2 Qh)\cos\alpha=\\(Qh+Gh_g)\sin\alpha+RL_{RO_1}\end{cases}\tag{1}$$

式中:L_{QO_1},L_{GO_1},L_{RO_1} 分别为顶梁等效集中载荷Q、

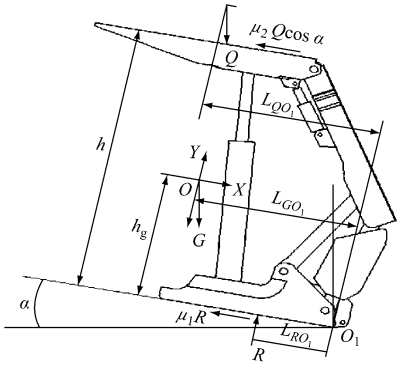


图 2 液压支架后仰状态力学模型

Fig. 2 Mechanical model for backward fall of hydraulic support

重力 G 在支架垂向分量和底座集中载荷 R 到 O_1 的力臂；h_g 为支架重心到底座的垂直距离。

当液压支架顶梁与顶板脱离接触时，容易后仰，此时 $Q=0$，R 作用点集中到 O_1，$L_{RO_1}=0$。由力矩平衡方程，得出后仰临界失稳角 $\hat{\alpha}_h$ 为

$$\hat{\alpha}_h = \arctan\left(\frac{L_{GO_1}}{h_g}\right) \tag{2}$$

液压支架前倾条件下的受力模型如图 3 所示。

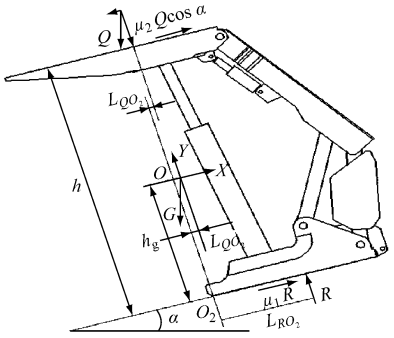


图 3 液压支架前倾条件下的受力模型

Fig. 3 Mechanical model for forward fall of hydraulic support

失稳时以底座前端 O_2 点为支点前翻，因此，O_2 点取矩平衡方程组为

$$\begin{cases} (Q+G)\sin\alpha = \mu_1 R + \mu_2 Q\cos\alpha \\ (Q+G)\cos\alpha = R \\ (QL_{QO_2} + GL_{GO_2} + \mu_2 Qh)\cos\alpha = \\ \quad (Qh + Gh_g)\sin\alpha + RL_{RO_2} \end{cases} \tag{3}$$

式中 L_{QO_2}，L_{GO_2}，L_{RO_2} 分别为顶梁等效集中载荷 Q、重力 G 在支架垂向分量和底座集中载荷 R 到 O_2 的力臂。

当液压支架顶梁与顶板脱离接触时，容易前翻，此时 $Q=0$，R 作用点集中到 O_2，$L_{RO_2}=0$，此时前翻临界失稳角 $\hat{\alpha}_q$ 为

$$\hat{\alpha}_q = \arctan\left(\frac{L_{GO_2}}{h_g}\right) \tag{4}$$

在工作面倾斜方向，液压支架主要有下滑和侧翻 2 种失稳倾向，倾斜方向的受力模型如图 4 所示。

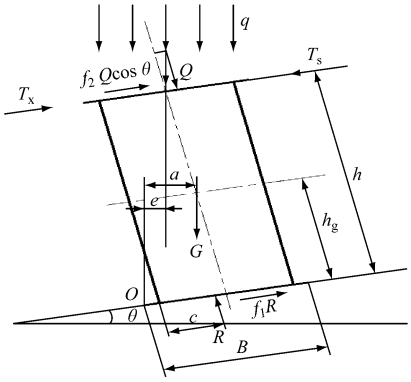


图 4 液压支架倾斜方向受力模型

Fig. 4 Mechanical model of hydraulic support along incline directions

倒架时以底座一侧 O 点为支点发生倾翻，O 点取矩平衡方程组为

$$\begin{cases} T_x + f_2 Q\cos\theta + f_1 R = (Q+G)\sin\theta + T_s \\ (Q+G)\cos\theta = R \\ (T_x - T_s)h_g + Qe + Ga + f_2 Q\cos\theta = Rc \end{cases} \tag{5}$$

式中：T_x，T_s 分别为下邻架和上邻架液压支架的扶持作用力；f_1 为底座与底板在倾斜方向的摩擦因数；f_2 为顶梁与顶板在倾斜方向的摩擦因数；a，c，e 分别为重力 G、底座集中载荷 R 和顶梁等效集中载荷 Q 到 O 的力臂。

由图 4 可知，液压支架自重和顶板合力的作用线位于 O 点右侧时，支架不会翻倒；仅受重力且无邻架扶持约束下，易发生倾覆，临界失稳角 $\hat{\theta}_h$ 为

$$\hat{\theta}_h = \arctan\left(\frac{B}{2h_g}\right) \tag{6}$$

式中 B 为液压支架的底座宽度，$B=2c$。

液压支架失稳概率与 h_g 呈正相关；增加支护设备与顶底板支架的摩擦因数可有效增大滑移临界倾角，从而有效防止支架的滑移失稳；$q=0$，液压支架最易发生失稳，带压移架可有效防止支架移架时的失稳。

1.3 液压支架重心确定方法

液压支架重心坐标是确定临界失稳角的直接条件，利用解析方法求取重心坐标变化。

根据文献[7]建立液压支架节点坐标图（图 5），确定部件质心和节点的相对位置，用质心公式（式 7）求取液压支架整体质心坐标（x_G，y_G）。

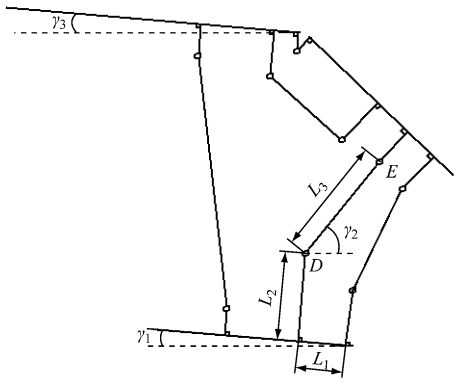


图 5　两柱掩护式液压支架节点坐标

Fig. 5　Node coordinates of two column shield hydraulic support

$$\begin{cases} x_G = \dfrac{\sum_i^n x_i m_i}{x_i} \\ y_G = \dfrac{\sum_i^n y_i m_i}{y_i} \end{cases} \tag{7}$$

式中:(x_i, y_i)为第 i 个部件的质心坐标;m_i 为第 i 个部件的质量;n 为支架部件的数量。

以前连杆为例,确定节点 D 和节点 E 的位置坐标(x_D, y_D),(x_E, y_E),其中,$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 分别为底座、前连杆及顶梁与水平面之间的夹角。根据式(8)—式(10)求取前连杆的质心坐标(x_b, y_b)。

$$\begin{cases} x_D = L_1 \cos \gamma_1 - L_2 \sin \gamma_1 \\ y_D = L_1 \sin \gamma_1 + L_2 \cos \gamma_1 \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} x_E = x_D - L_3 \cos \gamma_2 \\ y_E = y_D + L_3 \sin \gamma_2 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} x_b = \dfrac{1}{2}(x_D + x_E) \\ y_b = \dfrac{1}{2}(y_D + y_E) \end{cases} \tag{10}$$

式中:L_1 和 L_2 为前连杆的定位尺寸;L_3 为前连杆长度。

2　液压支架承载状态分析

液压支架与围岩处于耦合状态时,主要表现为承载失稳,顶梁合力作用大小及位置是耦合状态的重要表征和稳定性判断的重要依据。将掩护梁与顶梁铰接点的受力作为参量进行测量,精准求取顶梁受力情况,顶梁受力精准解算模型如图 6 所示。

取顶梁为隔离体进行受力分析,铰接点 M 取矩平衡方程为

$$\begin{cases} Q = P_1 \cos \theta_1 + P_2 \cos \theta_2 + F_{My} \\ F_f = P_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin \theta_2 + F_{Mx} \\ Qx = P_1 \cos \theta_1 L_4 + P_2 \cos \theta_2 L_5 + F_f L_6 \end{cases} \tag{11}$$

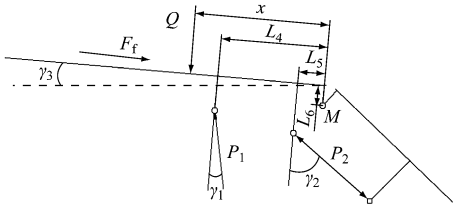


图 6　顶梁受力精准解算模型

Fig. 6　Accurate calculation of jacking beam model

式中:P_1, P_2 分别为立柱和平衡千斤顶的作用力;θ_1, θ_2 分别为立柱和平衡千斤顶与顶梁垂线之间的夹角;F_{Mx}, F_{My} 为铰接点 M 水平和垂直作用力分量;F_f 为顶梁所受摩擦力;L_4, L_5 分别为立柱和平衡千斤顶的定位尺寸;L_6 为铰接点 M 的定位尺寸。

由图 5 各铰接点坐标确定 θ_1 和 θ_2 的值,通过式(11)求出合力作用大小 Q 和位置 x 与 F_{Mx}, F_{My} 及 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 的函数表达式。

根据液压支架的力平衡区理论,两柱掩护式液压支架的平衡区是指以外载荷在顶梁上的位置 x 为横坐标,以顶梁等效集中载荷 Q 为纵坐标的曲线下的面积,如图 7 所示。将支架承载能力区划分为 3 个区域:平衡缸受拉工作区;立柱工作区($Q_2(x)$下的面积);平衡缸受压工作区。其中,$Q_1(x)$～$Q_3(x)$为在不同作用位置所能承载的最大载荷。

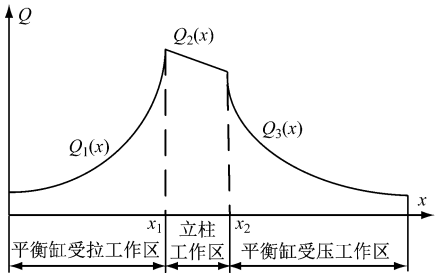


图 7　两柱掩护式液压支架力平衡区

Fig. 7　Force balance area of two column shield hydraulic support

将顶梁等效集中载荷 Q 幅值大小及作用位置与 $Q_1(x)$～$Q_3(x)$进行比较,判断该载荷是否在液压支架的力平衡区,如果在力平衡区,则表示在该载荷作用下,支架的顶梁与底板可以保持稳定;否则,支架顶梁发生转动,出现“低头”或“高射炮”等姿态失稳线性接触,控顶效果差,易发生结构损坏现象。

3　液压支架支护状态感知原理

3.1　支护状态分类感知

通过对空间几何失稳和承载失稳主要模式及判别方法的分析,可知液压支架支护关键影响参数为倾角、压力和销轴力,具体见表 1。

表 1 失稳状态分类

Table 1 Classification of instability states

分类	失稳现象		判断指征
几何失稳	走向方向	后仰	$\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3$
		前倾	
	倾斜方向	滑移	θ
		倾倒(双向)	$\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3,\theta$
承载失稳	受拉工作区	高射炮	$\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3,P_1,P_2,F_{Mx},F_{My}$
	受压工作区	低头	

3.2 感知原理

由于当前液压支架的压力传感器已发展成熟[14],所以仅对倾角及销轴力参量的测量原理进行分析。

3.2.1 倾角感知

倾角传感器需测量走向和倾斜 2 个方向的变化,因此选用双轴倾角传感器[14]。加速度式倾角传感器通过双轴角度测量模块来测量设备左右和前后倾斜角度,并通过模-数转换采集模块对双轴角度数据进行转换,然后传送给 MUC 核心处理单元对数据进行复杂的运算校准,MUC 内置自动补偿和滤波算法,可消除环境变化造成的误差。该种传感器井下实际应用测量误差小于±1%。

文献[15]采用光纤光栅倾角传感器测量双轴倾角(图 8),为液压支架状态感知提供了新的测量手段。其工作原理如下:重球与摆杆固定连接,摆杆通过球铰连接于外壳上,重球可在垂直平面内连续转动;摆杆杆体中部与一悬臂梁连接,该悬臂梁末端与另一固定在壳体上的悬臂梁连接,上述 2 个悬臂梁都为等强度梁。该光纤光栅倾角传感器共布置3 条光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG),其中在悬臂梁 1 的前或后表面上布置 1 条光栅 FBG1,在悬臂梁 2 的左右两表面中间各布置 1 条光栅 FBG2 和 FBG2′,可实现双轴倾斜角度测量。

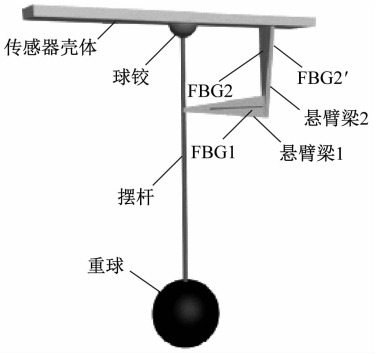


图 8 光纤光栅倾角传感器结构

Fig. 8 Structure of FBG inclination sensor

3.2.2 销轴力感知

测力销是将掩护式支架的联结销贴上电阻应变片改制的一种测力仪器,用来测定掩护式支架铰接点受力的大小和方向。由于支架高度和姿态的变化,顶梁与掩护梁铰接点受力大小和方向变动幅度较大,因此需采用 X/Y 双轴向测力销轴传感器,输出 2 路独立信号,同步计算出合力;采用双剪切梁式结构,测力销与顶梁之间相对固定。

4 结论

(1) 液压支架与围岩处于非耦合状态时易发生几何失稳,构建几何平衡方程,得出重心高度和工作面倾角是影响稳定性的关键因素。提出了顶梁、底座和前连杆 3 个倾角确定液压支架重心位置的方法,利用双轴倾角传感器实现状态的感知,为临界失稳角的判别提供了有效手段。

(2) 液压支架与围岩处于耦合状态时易发生承载失稳,构建液压支架合力作用点的精确求解方程,通过测力销轴实现顶梁与掩护梁铰接点作用力的感知,求取合力作用大小和位置,并根据平衡区理论判定承载失稳类型。

参考文献(References):

[1] 王国法,张德生.煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J].中国矿业大学学报,2018,47(3):459-467.
WANG Guofa,ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(3):459-467.

[2] 万丽荣,刘鹏,孟昭胜,等.特大采高液压支架稳定性分析研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):148-153.
WAN Lirong,LIU Peng,MENG Zhaosheng,et al. Study and analysis on stability of hydraulic powered support for ultra high mining[J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):148-153.

[3] 张武东.大倾角、大俯角条件下大采高液压支架稳定性的研究[J].矿山机械,2010,38(1):21-24.
ZHANG Wudong. Research on the stability of hydraulic support with the large mining height under conditions of the big inclination and the large depression angle [J]. Mining & Processing Equipment,2010,38(1):21-24.

[4] 贠东风,张袁浩,程文东,等.大倾角分层长壁综放工

作面支架状态分析与控制[J]. 煤矿安全,2015,46(10):213-216.

YUN Dongfeng,ZHANG Yuanhao,CHENG Wendong, et al. Support state analysis and control of fully mechanized longwall caving layered face with large inclined[J]. Safety in Coal Mines,2015,46(10):213-216.

[5] 徐亚军,王国法,刘业献. 两柱掩护式液压支架承载特性及其适应性研究[J]. 煤炭学报,2016,41(8):2113-2120.

XU Yajun, WANG Guofa, LIU Yexian. Supporting property and adaptability of 2-leg powered support [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2113-2120.

[6] 孟昭胜,曾庆良,万丽荣,等. 掩护式液压支架顶梁承载特性及其适应性研究[J]. 煤炭学报,2018,43(4):1162-1170.

MENG Zhaosheng,ZENG Qingliang,WAN Lirong, et al. Supporting performance and canopy adaptability of shield support[J] . Journal of China Coal Society, 2018,43(4):1162-1170.

[7] 文治国,侯刚,王彪谋,等. 两柱掩护式液压支架姿态监测技术研究[J]. 煤矿开采,2015,20(4):49-51.

WEN Zhiguo, HOU Gang, WANG Biaomou, et al. Attitude monitoring technology of two-prop shield powered support[J]. Coal Mining Technology,2015, 20(4):49-51.

[8] 张坤,廉自生,谢嘉成,等. 基于多传感器数据融合的液压支架高度测量方法[J]. 工矿自动化,2017,43(9):65-69.

ZHANG Kun, LIAN Zisheng, XIE Jiacheng, et al. Height measurement method of hydraulic support based on multi-sensor data fusion[J]. Industry and Mine Automation,2017,43(9):65-69.

[9] 杜毅博. 液压支架支护状况获取与模糊综合评价方法[J]. 煤炭学报,2017,42(增刊 1):260-266.

DU Yibo. Supporting condition acquisition and fuzzy comprehensive evaluation method for hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1):260-266.

[10] 陆庭锴,马鹏宇,冯卓照,等. 液压支架姿态动态监测与控制系统设计[J]. 煤炭科学技术,2014,42(增刊 1):169-170.

LU Tingkai, MA Pengyu, FENG Zhuozhao, et al. Design on posture dynamic monitoring and control system of hydraulic support[J]. Coal Science and Technology,2014,42(S1):169-170.

[11] 孙君令. 姿态数据驱动的液压支架运动状态监测技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.

SUN Junling. Research on motion state monitoring technology of hydraulic support driven by posture data[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology,2019.

[12] 张文杰,宋建成,田慕琴,等. 液压支架运行状态分级监测系统研制[J]. 工矿自动化,2017,43(7):12-17.

ZHANG Wenjie, SONG Jiancheng, TIAN Muqin, et al. Development of hierarchical monitoring system of operating state of hydraulic support[J]. Industry and Mine Automation,2017,43(7):12-17.

[13] 胡亮. 无线低功耗液压支架压力监测系统设计[J]. 工矿自动化,2017,43(6):83-86.

HU Liang. Design of wireless pressure monitoring system of hydraulic support with low power consumption[J]. Industry and Mine Automation, 2017,43(6):83-86.

[14] 侯刚. 矿用液压支架综合工况评价模型研究[J] . 工矿自动化,2019,45(2):96-100.

HOU Gang. Research on evaluation model of comprehensive condition for mine-used hydraulic support[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2):96-100.

[15] 马盟. 基于光纤传感技术的液压支架姿态监测研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.

MA Meng. Research on posture monitoring of hydraulic supports based on optical fiber sensing technology[D]. Xuzhou:China University of Mining & Technology,2018.